

第3章

標高8,000mにおける誤差が20mの高度計を設計する

――MEMS圧力センサの民生機器への応用

Heikki Timonen

フィンランドのVTI Technologies社は，広範囲の温度状況下で精度の高い測定を行えるMEMS圧力センサを開発した．分解能が0.2℃で精度が約±1℃の温度センサを組み込むことで，これを実現した．ここでは，本圧力センサの基本原理をまとめ，その応用事例として高度計を取り上げる．（編集部）

MEMS（micro electro mechanical systems）加速度/圧力センサの検出原理としては，大きくピエゾ（圧電素子）抵抗式と静電容量式の二つが挙げられます．ピエゾ抵抗式センサでは，通常，四つの抵抗がブリッジ接続されています．抵抗値の変動を測定することで，圧力を検出します．ピエゾ抵抗式センサは，温度や機械的応力，ノイズ，時間によるドリフトなどに対して非常に敏感です．加えて，オーバレンジ能力が極めて限られている，電流消費が大きいなどの欠点があります．

1 MEMSセンサの基本原理

上記のような理由から，筆者ら（フィンランドVTI Technologies社）はMEMS加速度センサおよび圧力センサを開発するにあたって，静電容量式を採用しました．この方式のセンサは，圧力が加わることによって2枚の平板（電極）の間の距離が変化することを利用して測定を行います．

筆者らが開発した加速度/圧力センサは，Si（シリコン）基板そのものを微細加工して3次元構造を形成する，いわゆるバルク・マイクロマシーニングを採用しています．微細な3次元構造を作るために，ウェット・エッチングやドライ・エッチングという技術を用います．加工後，組み立て工程ではSiウェハとガラス基板の接合，電極接続用構造，ワイヤ・ボンディングやはんだ付けによる接続などを施され，パッケージングされます．

● 静電容量がある程度大きければ精度の高い測定が可能

静電容量式センサの場合，測定範囲に対する相対的な容量変化は，通常30～50%です．このため，ピエゾ抵抗式センサとは異なり，電流レベルが低い状態でも高い*SN*比と精度を保つことができます．使用されているガラス絶縁基板は比較的厚く，高い絶縁抵抗（低リーク電流）と低浮遊容量を実現しています．ガラス絶縁基板とSiウェハは陽極接合されているので密閉構造となっており，キャパシタンスの電極間に化学薬品やちりなどが侵入する恐れもありません．

機械的構造を持つ箇所には単結晶Siが使用されており，ヒステリシスのない動作（塑性変形がない），優れたオーバレンジ特性，耐衝撃性が実現されています．これらは重要な特徴であり，表面マイクロマシン加工（Si基板などの最上層に薄膜を形成する方法）によるセンサと比較したときの利点でもあります．例えば，筆者らが開発したMEMS加速度センサは20,000*g*の耐衝撃性を備えています．また，MEMS圧力センサも測定範囲の10倍以上の大きな圧力（オーバレンジ）に耐えることができます．

静電容量式の加速度検知は，慣性質量の移動を直接測定することによって行われます（図1）．これは，二つの平板間のギャップが大きく変位することを前提としています．一対の平板（プレート）による静電容量（*C*）は，ギャップ幅（*d*）と平板面積（*A*）によって，次式で決まります．

$$C = A \cdot e_0 / d \qquad (1)$$

ここで，e_0は比誘電率

図1の構造の場合，ギャップの幅はμm単位であり，静電容量が比較的大きいため，高い精度で加速度を測定する

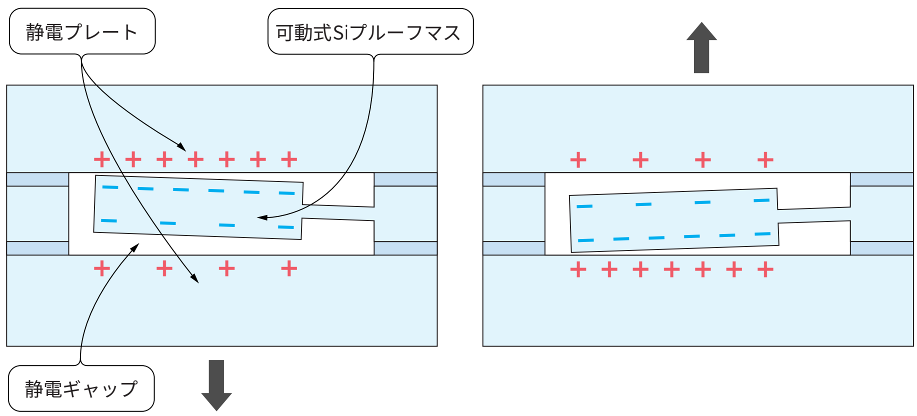


図1
1軸加速度センサの基本原理
下方向に加速度がかかると，中央の慣性質量（可動式のSi製プルーフマス）が上に動く．逆に，上方向に加速度がかかると慣性質量は下に動く．このときの静電容量の変化を読み取る．

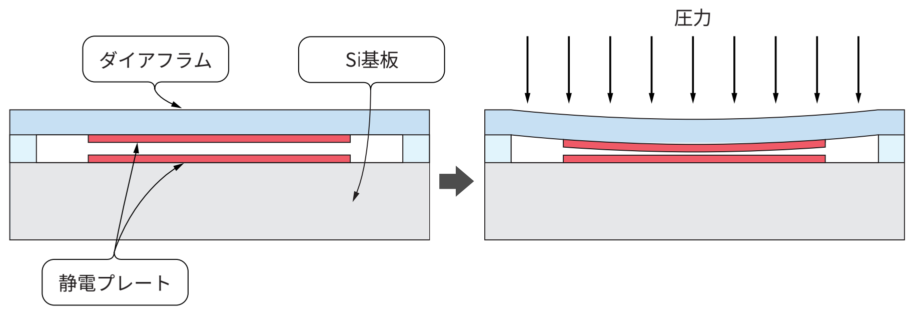


図2
圧力センサの基本原理
圧力が加わるとダイアフラムが曲げられ，ダイアフラムと静電プレートの間の静電容量が変化する．

ことができます．

静電容量式の圧力センサは，Siウェハ間のキャビティ内の基準圧力に対して，外部圧力が相対的に変化することによってダイアフラムに力がかかり，下側の電極に向かってダイアフラムが変形します（**図2**）．ダイアフラムの変位は，ダイアフラムとそれに対面する電極で構成される静電容量（C）の値の変化として検出されます．静電容量は，次の式により圧力の関数としてモデル化できます．

$$C_{model}(p) = C_{00} + \frac{C_0}{1-\frac{C_0}{k}p} + \frac{aC_0}{1-\frac{C_0}{bk}p} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで，関数$C(p)$はダイアフラムにかかる力の値で線形量です．この値は，線形性に関する要求を満たすために，簡単な多項関数を使って線形化できます．

筆者らが開発したMEMS圧力センサの回路図を**図3**に示します．測定範囲とその近傍では，素子は通常圧力検知素子モデルに従って機能します．出力は式(2)で求めることができます．入力圧力が通常の測定範囲を超えた場合，出力は過圧検知素子モデルに従ったものとなります．これは，センサ内でダイアフラムが静電プレートに接触することを意味します．この場合，出力を圧力の関数として求めることができなくなります．圧力が測定範囲に戻れば，再び通常の圧力検知モデルに従って機能し，もとどおり良好な性能を発揮します．すでに述べたように，この圧力センサは測定範囲（フルスケール）の10倍の圧力に耐えることができます．そのため，オーバレンジになっても，性能が劣化することはありません．

●「低消費電力」というコンセプトの圧力センサを開発

筆者らは，おもにバッテリ駆動のハンドヘルド・デバイスを念頭に置いて，低消費電力の絶対圧センサというコンセプトをもとに，圧力センサ「SCP1000」を開発しました

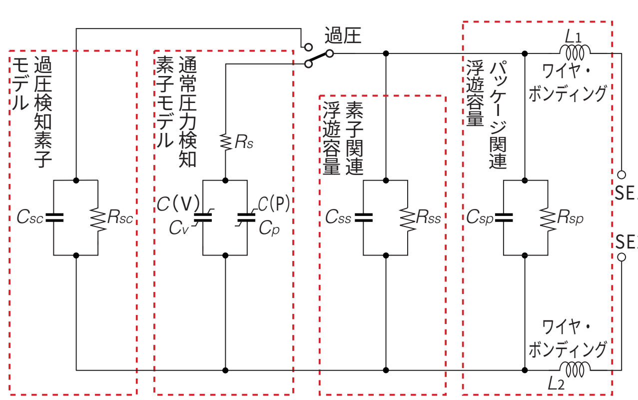


図3　圧力センサの回路図
測定範囲とその近傍では，素子は通常の圧力検知素子モデルに従って機能する．入力圧力が通常の測定範囲を超えた場合，出力は過圧検知素子モデルに従う．

(**写真1**)．測定範囲は，大気圧レベル(120kPa)～25bar(2500kPa)にまで拡張できます．出力はディジタル値で，SPI(serial peripheral interface)またはI^2C(Inter-Integrated Circuit)バスを使用します．本圧力センサは，SMD(surface mount device；表面実装部品)であり，非腐蝕性環境で使用することを前提としています．ただし，外形寸法が直径6.1mm，高さが1.7mmという大きさなので，腐蝕性物質からの保護も容易です．

本圧力センサには，静電容量式のセンサ素子のほか，CMOSインターフェースASICや，分解能が0.2℃で精度が約±1℃の温度センサなどが組み込まれています(**図4**)．最大限の性能を発揮できるように，3次多項関数によって，圧力および温度の校正を行います．

以下では，30k～120kPa(高度にしておよそ－1,000m～+9,000mに相当)の範囲で機能する場合について説明します．そのほかの測定範囲における精度は，その圧力値にほぼ比例すると考えて差し支えありません．

SCP1000は，分解能や処理速度，消費電力など，要求が異なるさまざまなアプリケーションに合わせて各種の測定モードを選択できます．すべてのモードは，2.4～3.3Vの電源で利用できます．高分解能モードで使用した場合，本圧力センサは6Pa未満という高い分解能を発揮します．これは，海面高度付近で40cmの変位に相当します．この分解能は，毎秒2回のサンプリング・レートと，連続使用時で30μA未満の低消費電流によって実現されます．高速モードでは分解能が1/4に落ちますが，速度は4倍に向上します．

消費電力を節約するためには二つの選択肢があります．その一つが低電力モードを使用することです．この場合，各測定後にセンサがスタンバイ・モードに入りますが，通常，消費電流は3μA～4μAとなります．このモードでは，センサはディジタルSPI(I^2C)インターフェースを介して，次の測定に備えて待機状態を維持します．

もう一つの方法は，測定と測定の間，電源をOFFにしてしまうことです．この場合，消費電力は少なくなりますが，再起動するのに約10msかかってしまうので注意が必要です[注]．

注：本製品の詳細は，筆者らのWebサイト(http:// www.vti.fi/)を参照のこと．

2 圧力センサを高度計として利用する

本圧力センサは，高い精度と線形性を備えています．ハンドヘルド・デバイスが使用される通常の屋外環境，すなわち10～40℃の範囲において，海面高度付近で2m以下の精度を実現することができます．より広い高度範囲と温度範囲，すなわち0～3,000m，+10～+40℃の範囲においても，30m以下の精度を維持できます．この場合の非線形性は1m未満で，ほとんど問題とはなりません．

● ターゲットは，バッテリ駆動の健康機器やスポーツ用品

本圧力センサのターゲットとなるのは，おもに健康機器，スポーツ/アウトドア用品などの分野ですが，とくにスポーツ/アウトドア用の腕時計，ダイビング・コンピュータなど



写真1　圧力センサ「SCP1000」の外観

本圧力センサは，直径＝6.1mm，高さ＝1.7mmであり，腐蝕性物質からの保護も容易．本圧力センサにはOリングによるシールのための円形の垂直な壁面があるが，多湿環境や水などの液体中で測定を行う場合，これは重要な特徴となる．

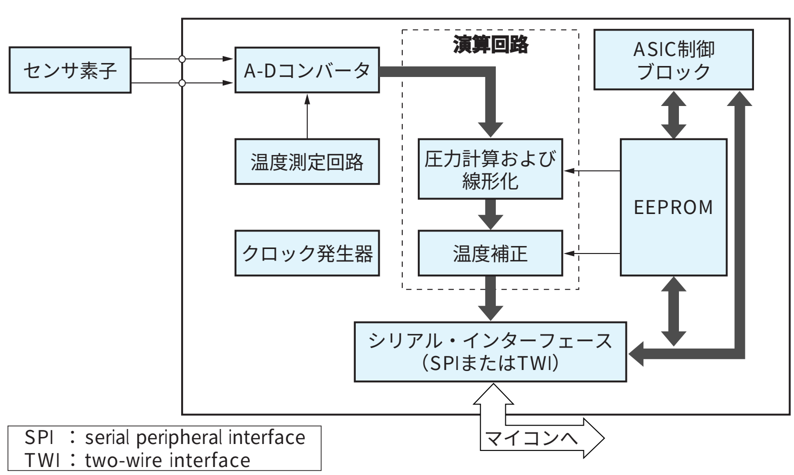


図4　SCP1000圧力センサのブロック図

ASICには，オンチップ校正メモリが内蔵されている．MID(molded interconnect device) LCP(liquid crystal plastic)パッケージを採用．

のハンドヘルド・デバイスを指向しています．これらのアプリケーションでは，小型でコスト効果の高いデザイン，低消費電力，適切な分解能と精度といった特徴の組み合わせが重要になります．ナビゲーション・システムにおいて本圧力センサを高度計として使用すれば，GPS（Global Positioning System）信号を補完することができます．

通常の条件下で測定モードの選択によっては，1m未満の分解能と1mの精度レベルを維持できるため，スポーツやフィットネスにおいて，累積高度差（登り）の精密な計算を通じて，エネルギー消費やトレーニング効果を知ることができます．一方，高速モードと広範な高度および温度範囲にわたる性能を利用すれば，スカイ・ダイビング，パラグライディング，そのほか同様のアプリケーションにおいても新しい可能性を開くことができます．

スポーツやアウトドア活動では，気圧センサによる気圧測定によって，地域的な気象を予測したり，酸素分圧を測定したりすることもできます．

正確，小型，低消費電力などの条件を備えた圧力検知機能は，医療分野にも応用可能です．血圧や脳圧の検知はその典型的な例です．気圧センサは高い分解能を備えているため，液体レベル・センサとしても優れた性能を発揮します．その分解能は，水の場合で約3mmです．

16bar型のSCP1000は，ダイビング・コンピュータや水深検知を目的としたものです．さらに，産業用の液面レベル測定や空気圧システムにも使用できます．この場合，センサの低消費電力という特性を生かしてワイヤレスとしたり，バッテリレス・トランスポンダに組み込んだりすることも可能です．

● 圧力センサを高度計として使用する

圧力に基づく高度測定は相対的なものです．つまり，異なる場所の圧力を比較することで高度の測定が行われます．これは一つの圧力センサを用いて実現できますが，この場合は大気圧の変化を検出できる程度の分解能が必要です．長時間にわたって正確な高度情報が必要な場合は，基準大気圧がよく使われます．

1976年の米国標準大気における気温てい減率を使用すると，高度Hは気圧Pの関数として式(3)で求めることができます．

$$H = T_0/(-dT/dH) \times [1-(P/P_0)^{(-dT/dH)\times R/g}] \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

ここで，$dT/dH = -6.5$ ℃/km，$T_0 = 288.15$K（＋15℃），$P_0 = 101325$Pa，$g = 9.82$m/s^2，R（気体定数）=287.05^{2}m^2/s^2/Kを代入すると，次の値が得られます．

$$H = 44.33\text{km} \times [1-(P/101325\text{Pa})^{0.19}] \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

式(3)は，気温T_0または基準気圧P_0，もしくはその両方が標準値と異なるようなケースにも適用することができます．これは，高度にかかわらず圧力の相対変化（$\Delta P/P_0 = (P-P_0)/P_0$）と実際の温度が高度の変化を決定することを意味します（**表1**の標高4,200mにおけるモデルを参照）．重力加速度は緯度によって変化します．これによって，海面高度から8,000mの範囲で最大約30mの誤差が生じますが，この誤差は$g = 9.80665$m/s^{2}とすることによって最小20m

表1　各モデルと高度誤差

緯度や多項式近似による高度誤差の計算結果を示した．

標準値			標高4,200mにおけるモデル		北極モデル（g = 9.83217m/s²）		赤道モデル（g = 9.78039m/s²）		標高0mにおけるP_0（3次多項式）		標高0mにおけるP_0（6次多項式）	
圧力[Pa]	高度[m]	気温[℃]	高度[m]	誤差[m]	高度[m]	誤差[m]	高度[m]	誤差[m]	高度[m]	誤差[m]	高度[m]	誤差[m]
101325	0	15	0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
91193	880	9	880	0.00	878	2	882	−2	880	0	880	0
82073	1,742	4	1,742	0.00	1,738	4	1,747	−5	1,740	−2	1,742	0
73866	2,587	−2	2,587	0.00	2,581	7	2,594	−7	2,578	−10	2,587	0
66479	3,416	−7	3,416	0.00	3,407	9	3,425	−9	3,388	−28	3,415	−1
59831	4,228	−12	4,228	0.00	4,217	10	4,239	−11	4,168	−60	4,226	−2
53848	5,024	−18	5,024	0.00	5,012	12	5,036	−13	4,914	−110	5,018	−6
48463	5,804	−23	5,804	0.00	5,790	14	5,818	−15	5,622	−182	5,790	−14
43617	6,569	−28	6,569	0.00	6,553	16	6,585	−16	6,292	−277	6,540	−28
39255	7,318	−33	7,318	0.00	7,301	17	7,336	−18	6,922	−396	7,267	−51
35330	8,053	−37	8,053	0.00	8,034	19	8,072	−20	7,511	−541	7,969	−84
31797	8,773	−42	8,773	0.00	8,752	20	8,794	−21	8,061	−711	8,642	−131

程度に抑えることができます(**表1**の北極モデル，赤道モデルを参照)．式(3)は，$\Delta P/P_0$の次数を選択して，テイラー多項式を使用することで近似できます(**表1**のn次多項式を参照)．

多項式の係数を少し変更すれば，より正確な結果が得られるはずです．ほとんどの場合，測定する高度変化は比較的小さく，多項式による近似誤差は無視できる程度のものです．

これまで，累積高度差(登り)を十分な精度で測定することは困難でしたが，SCP1000の高分解能モードを用いることでこれを実現できます．この高度差は，例えば心拍数モニタ，スポーツ・ウォッチ，リストトップ・コンピュータなどを使用してトレーニング効果やエネルギー消費を計算するための重要なパラメータです．これは，毎秒2回のデータのサンプリング・レート，40cm(6Pa)以下の分解能，20μA～30μAの連続消費電流によって初めて実現できました．さらに，更新間隔を1秒間まで延長すれば，電流消費を10μA未満に下げることができます．通常，海面高度から3,000mまでの範囲では，本圧力センサの温度依存度は1.5m未満，線形性も0.1m未満ですが，これは地域的な温度変化によって生じる変動よりもはるかに小さい値です．

Heikki Timonen
フィンランドVTI Technologies社 SCP1000 Product Manager

COLUMN 人材採用はハイテク企業の成功のかぎ

世界規模のハイテク産業ビジネスでは，次の世代を担うエンジニアがその企業の成功の重要なかぎを握っているといえます．北欧(スカンジナビア)では，大学生は在学中に職業訓練生として企業で働き，そこで体験したビジネス・ケースに基づいて卒業論文を作成するのが一般的です．

● 優秀な訓練生には責任のあるポジションを与える

筆者らの会社(VTI Technologies社)では，(おもに機械技術系学部の)大学1年生から職業訓練生を受け入れています．通常，大学1年生と2年生は夏休み中に生産ラインでオペレータ訓練生として働いています．また，経験を積むために学期中もパートタイマとして働く訓練生も一部います．これによって，学業の期間が通常よりも長くかかるというマイナス面はありますが，製品やその企業の手法に精通するには良い方法であると思います．

大学3，4年生の中でもっとも将来有望な訓練生は，「スペシャリスト訓練生」としてしごとを始めることができます(**写真A-1**)．この職種は責任を伴います．目標を設定されて，よりハードな職務を行ったり，あるいはプロジェクトに参加したりします．



写真A-1　研修のようす
「スペシャリスト」という研修生のポジションの責任は，明確な目標設定のもと，要求度の高い任務とさまざまなプロジェクトへの参加が含まれている．

職業訓練生はすでに社員や企業文化を理解しているため，筆者らにとっては新たに新人を採用するよりも職業訓練生を指名するほうがつごうが良いのです(ただし，卒業論文を書き終わらなければ，正式採用はしない)．

学生の立場からみれば，職業訓練を行う企業は早い段階で卒業論文の優れたテーマを見つけようと協力してくれます．ここで見つけたテーマは，実際のビジネスの発展を支え，企業のすぐれた経営状態を改善するために貢献するものであるべきです．こうした訓練によって学生が受ける最大のメリットは，責任の負いかたを学べることです．

● 積極的に学生を援助

2005年に筆者らは69名(生産部門：47名，計画・財務などの支援部門：22名)の学生を職業訓練生として受け入れました．この訓練生のうちの約65%が，おもに研究開発関連の業務やハードな開発プロジェクトにおいて，早くから職業訓練を受けてきた人たちです．

筆者らはフィンランド国内でいくつかのリクルート・フェアに参加し，ターゲットとして指名した複数の学生に対して，より打ち解けた雰囲気のイブニング・セッションを開催しています．これらの会合を成功させる重要なポイントは，さまざまな大学協会と継続的に協力(コミュニケーション)していくことです．

スカンジナビアにおけるビジネス競争が激化する中，企業に合った上級レベルの専門家を見つけるのは難しいため，将来のエンジニアやデザイナの教育に積極的にかかわることがとても重要です．このモデルは，人口構成が似ており，今後10年以内に高齢者が勤労生活から離れていく日本にも適用できるかもしれません．

Tomy Runne(1998年職業訓練生)
VTI Technologies社 アジア太平洋地域エリアマネージャー